

На правах рукописи

**Мик Иван Александрович**

**ФИЛЬТРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ НА ОСНОВЕ  
НАНОВОЛОКНИСТОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ  
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОНКОЙ ОЧИСТКИ  
ВОЗДУХА**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: Ларичкин Владимир Викторович  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Бальчугов Алексей Валерьевич, доктор  
технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО  
«Ангарский государственный технический  
университет», проректор по научной работе

Асламова Вера Сергеевна, доктор технических  
наук, профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский  
государственный университет путей  
сообщения», профессор кафедры «Техносферная  
безопасность»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
Томский государственный университет»

Защита диссертации состоится «11» июня 2019 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.08 в Бийском технологическом институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.bti.secna.ru](http://www.bti.secna.ru) Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Автореферат разослан «15» марта 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Шалунов А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Естественные и антропогенные источники загрязнения воздуха ежегодно выбрасывают в атмосферу сотни миллионов тонн взвешенных частиц. Эти частицы оказывают отрицательное влияние на качество жизни населения, влияют на экосистемы и климат Земли. По данным глобальной статистики 2017 г. Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), загрязнение воздуха в помещениях и на открытых пространствах вызывает по всему миру около 6,5 млн. смертей (или 11,6 % смертей) в год. На данный момент, согласно оценке степени риска для здоровья ВОЗ, проблема плохого качества воздуха стоит на четвертом месте после высокого кровяного давления, некачественного питания и курения.

Кроме того, производство микроэлектроники, фармакологических препаратов, продуктов питания и т.п. предъявляет повышенные требования к чистоте и стерильности атмосферы рабочих зон производственных помещений. Поэтому такие производства располагают в, так называемых, чистых помещениях, в которых поддерживается определенный класс чистоты воздуха (ГОСТ ИСО 14644-1-2002). В свою очередь, особые требования к чистоте воздуха предъявляются в медицинских учреждениях. Медицинские чистые помещения необходимы в родильных отделениях, палатах реанимации, операционных блоках.

На практике для выполнения требований нормативных документов используются высокоэффективные фильтрующие элементы. Недостатком таких фильтрующих элементов является непрочный фильтрующий материал, который может легко повреждаться при монтаже фильтрующего элемента, что приводит к браку продукции при производстве и угрозе причинения вреда жизни и здоровью людей. С точки зрения технологии производства недостатком является сложная конструкция фильтрующего элемента (требует множества технологических операций при производстве), что составляет значительную часть стоимости фильтрующего элемента. Также большая площадь фильтрующего материала и, как следствие, большая протяженность границы корпуса элемента и фильтрующей бумаги предъявляют высокие требования к качеству сборки фильтрующего элемента.

Преодолеть вышеперечисленные недостатки можно либо совершенствованием существующих подходов к производству фильтрующих элементов, либо новой разработанной технологией изготовления, превосходящей конкурирующие решения в простоте конструкции. Анализ литературных источников показывает, что совершенствование существующих подходов производства фильтрующих элементов достигло своего предела. Поэтому, преодолеть недостатки существующих решений может новая технология производства комбинированных фильтрующих элементов. Комбинированные фильтрующие элементы должны обладать высокой эффективностью захвата частиц при хорошей воздушной проницаемости и низкой себестоимости. Такой новый вид фильтрующих элементов имеет перспективы применения в различных областях, начиная от бытовых средств поддержания чистоты воздушной среды в жилых помещениях, индивидуальной

защиты и промышленной безопасности, до организации атмосферы в чистых помещениях медицинского и специального производственного назначения.

Представленная диссертационная работа выполнялась при финансовой поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», программа «Умник», государственный контракт №12033ГУ/2017 от 04.07.2017 г.

**Степень разработанности темы.** Задачи повышения эффективности тонкой очистки воздуха решали многие научные группы: НИФХИ им. Л.Я. Карпова г. Москва (Петрянов И.В., Фукс Н.А., Филатов Ю.Н.), НИЦ «Курчатовский институт» г. Москва (Стечкина И.Б., Кирш А.А.), Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН г. Москва (Кирш В.А.). В большей степени изучены процессы электроформования так называемых фильтрующих элементов Петрянова-Соколова. На данный момент общее количество публикаций по теме электроформования составляет более десятка тысяч. По данным национального университета Сингапура, работы в области электроформования ведут 143 университета и 55 исследовательских институтов.

Совершенствование технологии производства фильтрующих элементов Петрянова-Соколова достигло того уровня, что при заданных технологических параметрах оборудование способно создавать продукт заданного класса очистки и гидравлического сопротивления.

Однако главным недостатком элемента Петрянова-Соколова является сложный процесс производства. Кроме того, технология производства фильтрующих элементов Петрянова-Соколова включает создание поддерживающих и разделительных элементов (жесткий корпус) для фильтрующего материала, что усложняет процесс производства.

Следует отметить, что не существует расчётной модели, способной предсказывать основные характеристики фильтрования и ресурс эксплуатации фильтрующего элемента.

Чтобы реализовать технологию изготовления фильтрующих элементов нельзя использовать стандартные станки для создания элементов тонкой очистки воздуха.

**Цель работы:** разработка и изготовление фильтрующего элемента с повышенной эффективностью улавливания высокодисперсных частиц за счет применения наноразмерной волокнистой фильтрующей среды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

– предложить и разработать численную физико-математическую модель фильтрования частиц, учитывающую влияние размеров и технологии размещения волокнистой фильтрующей среды и позволяющую прогнозировать основные характеристики фильтрующего элемента в процессе эксплуатации;

– на основании анализа предложенной модели выявить наиболее эффективную композицию волокнообразующих полимеров, способные обеспечить повышение эффективности фильтрующего элемента и увеличение ресурса его эксплуатации;

– предложить и разработать комбинированный способ формования фильтрующего элемента на основе выбранной наноразмерной волокнистой фильтрующей среды с применением процессов экструзии и электроформования;

– предложить и разработать эффективный принудительный способ снятия электрического заряда при изготовлении фильтрующих элементов;

– разработать технологию изготовления, которая позволит получать высокоэффективный фильтрующий элемент за один технологический этап;

– провести исследования функциональных возможностей созданного фильтрующего элемента и его ресурсные испытания для подтверждения повышения эффективности реализуемого процесса улавливания высокодисперсных частиц и определения ресурса эксплуатации;

#### **Научная новизна:**

– впервые на основе физической теории фильтрации, предложена и разработана численная модель комбинированного фильтрующего элемента, учитывающая улавливание частиц каркасными и фильтрующими волокнами и позволившая проанализировать влияние размеров и размещения волокон на фильтрующие свойства в процессе эксплуатации, выявить новые сочетания и взаимовлияния волокон и их распределений по толщине материала для повышения эффективности фильтрации и увеличения ресурса эксплуатации;

– впервые предложен новый способ формования, позволяющий изготавливать фильтрующий элемент, в котором входящие частицы распределяются равномерно по толщине материала фильтрующего элемента, что позволяет снизить энерго- и ресурсозатраты на реализацию технологического процесса формования фильтрующего элемента;

– впервые, на основе анализа закономерности распределения стекания заряда, выявлена возможность принудительного снятия электрического заряда заземленным проволочным электродом;

– впервые предложена и реализована одностадийная технология формования высокоэффективных воздушных фильтрующих элементов;

#### **Практическая значимость работы:**

– создан фильтрующий элемент на основе применения и реализации технологии комбинированного формования, имеющий характеристики, превышающие известные аналоги; при скорости фильтрования 5 см/с эффективность очистки и перепад давления 99 % и 41 Па, соответственно, значение коэффициента фильтрующего действия комбинированного элемента при скорости фильтрования 1 см/с составило  $2,2 \text{ (мм вод. ст.)}^{-1}$ ;

– предложена и разработана технология, основанная на комбинированном применении методов экструзии и электроформования, с реализацией предложенного способа принудительного снятия электрического заряда с поверхности фильтрующего элемента в процессе изготовления, обеспечившая формирование фильтрующих элементов повышенной эффективности и увеличенного срока эксплуатации;

– для практической реализации предложенной и разработанной технологии реализована на практике конструкция станка формования комбинированного фильтрующего элемента;

Результаты диссертационной работы внедрены на АО «Холдинговая Компания Тион» г. Новосибирск при реконструкции установок серийного производства воздушных фильтрующих элементов и в учебный процесс ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

**Положения, выносимые на защиту:**

– численная модель, учитывающая влияние каркасных и фильтрующих волокон комбинированного элемента, а также изменение плотности упаковки при улавливании частиц в слоях материала фильтрующего элемента, позволяющая устанавливать зависимости распределения нановолокон по толщине фильтрующего элемента и определять оптимальные режимы формования;

– полученные в результате исследований рецептуры, композиции полимер/полимер и полимер/растворитель, данные о влиянии температуры экструзионного расплава на формование фильтрующих нановолокон, обеспечившие оптимизацию процесса формования и исключение дефектов материала фильтрующего элемента;

– предложенный и практически реализованный способ снятия электрического заряда с полимерного фильтрующего элемента, обеспечивший реализацию технологии изготовления комбинированного фильтрующего элемента;

– выявленные режимы и условия формования элемента, обеспечивающие максимальные характеристики фильтрования (эффективность очистки и перепад давления);

**Достоверность результатов** подтверждается результатами лабораторных испытаний и результатами опытной эксплуатации, подтверждающими достижение необходимых фильтрующих характеристик по эффективности очистки и времени эксплуатации, проведенными с помощью современных средств измерения (спектрометр наночастиц TSI, модель 3938, дифференциальный манометр Testo 512) и вспомогательных методов (генератор аэрозолей АТМ 226, регулятор расхода газа РРГ-12), успешной апробацией разработанных методов и устройств, удовлетворительным согласием экспериментальных данных, полученных различными электростатическими способами измерений; проверкой воспроизводимости микро – и наноструктуры, химического состава лабораторных образцов, полученных с помощью различных производственных аппаратов (экструдеров) при помощи современных точных методов анализа (оптической (ОМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), метод аналитического взвешивания, инфракрасной термографии (ИТ), инфракрасной Фурье спектроскопии (ИКФС)); воспроизводимостью результатов испытаний характеристик фильтрования.

**Объекты, предметы и методы исследования.** Объектами исследования являются новый нетканый самонесущий материал фильтрующего элемента и его рецептурные композиции полимер/полимер и полимер/растворитель, обладающие высокой фильтрующей способностью. Предмет исследований – технология изготовления фильтрующего элемента с применением процесса экструзии и метода электроформования на динамическую, с точки зрения

поверхностного электрического заряда, мишень (шпулю). В работе применены методы аналитических и экспериментальных исследований:

– методы математической статистики, численное решение обратной задачи с помощью метода наименьших квадратов (МНК) и обработки изображений;

– методы регулирования расхода газа, генерации аэрозолей для контроля дисперсности и концентрации тестового аэрозоля;

– методы измерения потенциала поверхности и электрического заряда пористого диэлектрика, позволившие рассчитать характерные времена стекания заряда с поверхности фильтрующего элемента;

– методы исследований влияния параметров процесса формования, свойств композиций полимер/полимер и полимер/растворитель, тестового загрязнителя на морфологию (структуру) нетканого материала фильтрующего элемента исследовали с применением методов аналитического взвешивания, ОМ, СЭМ, ИТ;

– методы измерения перепада давления и коэффициента проскока материала фильтрующего элемента (с применением рекомендованной ГОСТ Р ЕН 1822 аэрозольной жидкости «Бис-(2-этилгексил)овый эфир себаценовой кислоты» на аэрозольном стенде с помощью спектрометра TSI, модель 3938), показавшие эффективность разработанного способа формования фильтрующего элемента;

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Современное состояние науки и техники» (г. Сочи, 2016), молодёжном научно-инновационном конкурсе «Умник» (г. Новосибирск, 2016), VI Всероссийской конференции молодых ученых (г. Томск, 2016), XVII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.» (г. Новосибирск, 2016), 55-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2017 (г. Новосибирск, 2017), Международной конференция «Одиннадцатые Петряновские и Вторые Фуксовские чтения» (г. Москва, 2017), XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.» (г. Новосибирск, 2017), 10-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности» (г. Бийск, 2017), Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (г. Бийск, 2017), 56-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2018 (г. Новосибирск, 2018).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 4 статьи, из них 3 статьи в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий в соответствии с требованиями ВАК, 11 тезисов в сборниках докладов международных и всероссийских научно-технических конференций, получен 1 патент на изобретение.

**Личный вклад автора.** Вклад автора состоит в проведении патентного поиска, разработке новых методик и новой технологии формования

комбинированного фильтрующего элемента, подборе по основным эксплуатационным характеристикам композиций полимер/полимер и полимер/растворитель.

Автор диссертации принимал непосредственное участие в:

– разработке физико-математической модели и численном решении задачи нахождения оптимальной структуры комбинированного фильтрующего элемента;

– проведении экспериментов по измерению динамики электрического заряда и анализе экспериментальных данных;

– разработке конструкции и изготовлении опытной установки;

– определении технологических параметров формования образцов воздушных фильтрующих элементов;

– изготовлении лабораторных образцов и проведении испытаний их фильтрующей способности;

– сопоставлении полученных результатов с имеющимися литературными данными;

– подготовке публикаций;

**Структура работы.** Диссертация содержит 55 рисунков, 4 таблицы, изложена на 135 страницах машинописного текста и состоит из введения, 4 глав, основных результатов работы, 3 приложений. Список использованной литературы включает 89 наименований литературных источников.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность и благодарность к.ф.-м.н. Гореву Василию Николаевичу, д.т.н., профессору, заведующему кафедрой инженерных проблем экологии НГТУ, Ларичкину Владимиру Викторовичу, д.ф.-м.н., профессору Бардаханову Сергею Прокопьевичу и Мик Дарье Сергеевне.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описывается актуальность диссертационной работы в применении современных способов очистки воздуха, согласно межгосударственным стандартам (ГОСТ ИСО 14644-1-2002 и ГОСТ Р ЕН 1822). Показаны объекты исследования, сформулированы проблематика существующих решений и направление перспективных исследований в области фильтрующих сред.

**В первой главе** представлен обзор литературы, в котором отражены основные проблемы современных решений очистки воздуха высокоэффективными аэрозольными фильтрующими элементами и основные методы формования высокоэффективных волокнистых сред. В главе отмечено, что среди применяемых подходов электроформование является одним из самых перспективных и универсальных методов для создания полимерных волокнистых фильтрующих материалов с контролируемым диаметром волокон и морфологией. В разделе, посвященном проблеме накопления электрического заряда в процессе электроформования толстослойного фильтрующего материала, приведены научно-технические решения, способные устранять или компенсировать «паразитный» электрический потенциал формируемого

фильтрующего элемента. Аналитический обзор завершается выбором и обоснованием направления исследований.

**Во второй главе** приведены используемые в разрабатываемой расчётной физико-математической модели фильтрующего элемента, эмпирические и теоретические зависимости, позволяющие рассчитать характеристики фильтрования комбинированного материала фильтрующего элемента (материала, полученного совмещением метода электроформования и процесса экструзии). Данная глава представляет собой описание численной физико-математической модели и результаты моделирования работы крупногабаритного фильтрующего элемента, учитывающие объёмные изменения двух типов волокон в процессе эксплуатации. При помощи МНК выполнено численное решение обратной задачи нахождения оптимального распределения фильтрующих волокон по толщине материала фильтрующего элемента. Показано, что функционально-градиентный материал фильтрующего элемента с оптимальным распределением фильтрующих волокон имеет равномерную загрузку по массе уловленных частиц для каждого слоя фильтрующего элемента, что позволяет добиться максимальной пылеемкости фильтрующего элемента. Приведена оценка ресурса эксплуатации фильтрующих элементов с различным распределением фильтрующих волокон.

С целью прогнозирования работы фильтрующего элемента и поиска оптимального профиля концентраций волокон по толщине материала фильтрующего элемента и среднего диаметра волокон, было проведено моделирование работы воздушного фильтрующего элемента. Чтобы провести моделирование работы фильтрующего элемента, в работе выбран подход учёта изменения параметров фильтрующего материала при фильтровании выбранного ансамбля аэрозоля. Материал фильтрующего элемента представляет собой слоистую структуру, которая состоит из волокон двух типов: каркасных полипропиленовых (ПП) и фильтрующих полиамидных (ПА). Если известно, количество частиц, отфильтрованных каждым типом волокон в слое, можно вычислить суммарный коэффициент проскока для определенного диаметра частиц:

$$K^i = \prod_{j=1}^N K_{\text{ПП}}^{i,j} K_{\text{ПА}}^{i,j} \quad (1)$$

$$K_{\text{ПА}}^{i,j} = K_{\text{ПА}}^{i,j} (\beta_{\text{ПА}}^{i,j}, d_{\text{ПА}}^{i,j}, n^{i,j}, L_{\text{ПА}}^j) \quad (2)$$

$$K_{\text{ПП}}^{i,j} = K_{\text{ПП}}^{i,j} (\beta_{\text{ПП}}^{i,j}, d_{\text{ПП}}^{i,j}, K_{\text{ПА}} n^{i,j}, L_{\text{ПП}}^j) \quad (3)$$

где  $K^i$  – проскок комбинированного материала фильтрующего элемента для определенного диаметра частиц  $i$ -го загрязнения;  $K_{\text{ПА}}^{i,j}$ ,  $\beta_{\text{ПА}}^{i,j}$ ,  $d_{\text{ПА}}^{i,j}$ , – проскок, плотность упаковки волокон в слое, диаметр волокон после фильтрования на ПА волокнах  $i$ -го загрязнения в  $j$ -м слое фильтрующего элемента;  $n^{i,j}$  – количество частиц  $i$ -го загрязнения перед  $j$ -м слоем ПА волокон;  $K_{\text{ПП}}^{i,j}$ ,  $\beta_{\text{ПП}}^{i,j}$ ,  $d_{\text{ПП}}^{i,j}$  – проскок, плотность упаковки волокон в слое, диаметр волокон после фильтрования на ПП волокнах  $i$ -го загрязнения в  $j$ -м слое фильтрующего элемента;  $K_{\text{ПА}} n^{i,j}$  – количество частиц  $i$ -го загрязнения перед  $j$ -м слоем ПП

волокон (в модели первоначально ансамбль частиц фильтруется на ПА волокнах во вторую очередь на ПП волокнах);  $N$  – количество слоёв материала фильтрующего элемента,  $I$  – количество загрязнений,  $L_{ПП}^j$  и  $L_{ПА}^j$  – длина ПП и ПА волокон.

Системы уравнений (1 - 3) позволяют найти массу задержанных частиц после  $i$ -го загрязнения, а значит суммарную массу частиц и массу частиц в конкретном слое. На основании вышеперечисленного, можно описать эффективность фильтрования после  $i$ -го загрязнения выражением:

$$Eff_{сумм} = 1 - K^I \quad (4)$$

где  $Eff_{сумм}$  – эффективность фильтрования комбинированного материала фильтрующего элемента определенного диаметра частиц для выбранного периода эксплуатации.

Для определения начальных перепадов давлений создаваемых ПА и ПП волокнами использовались значение экспериментального перепада давления комбинированного материала фильтрующего элемента и материала, не содержащего фильтрующие волокна (ПП матрицы), из которого по обобщённой формуле гидродинамического перепада давления находились аэродинамические диаметры волокон. Из параметров эксперимента: расхода ПА раствора электроформования и расхода ПП экструдированного расплава находились начальные плотности упаковки и длина волокон в слое. Рост плотности упаковки и диаметра волокон учитывался через объём осевшего в слое аэрозоля, в приближении, что жидкий аэрозоль равномерно распределяется по всей длине фильтрующих волокон. Зная параметры фильтрующего элемента в каждом слое можно вычислить суммарный перепад давления:

$$\Delta P_{сумм} = \sum_{j=1}^N \Delta P^{i,j} \quad (5)$$

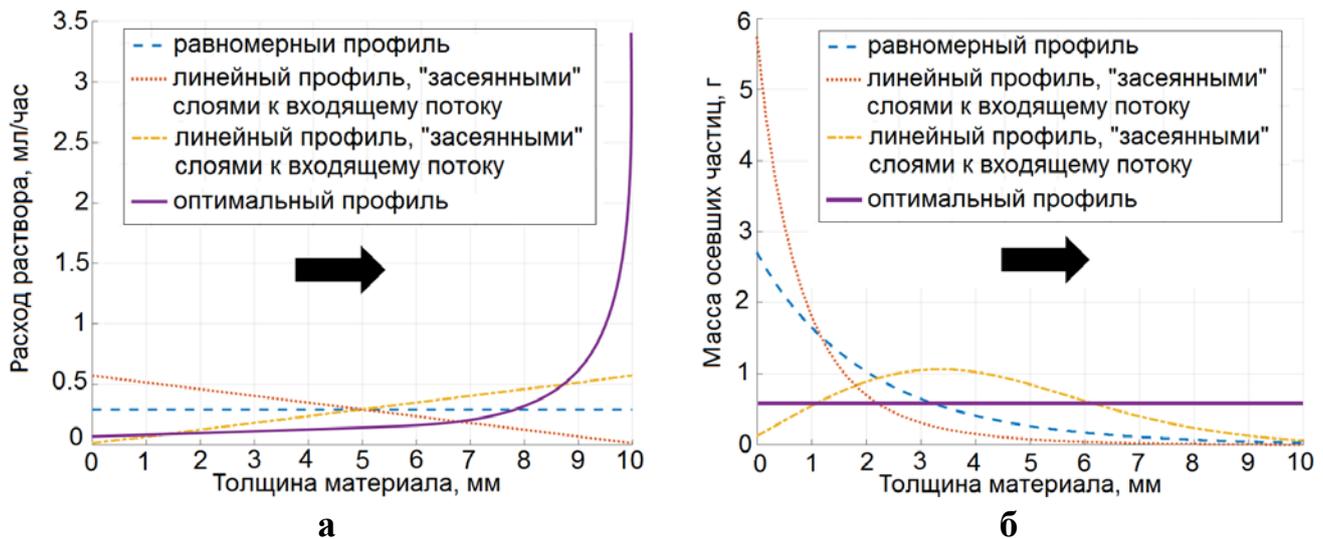
$$\Delta P^{i,j} = \Delta P_{ПА}^{i,j} + \Delta P_{ПП}^{i,j} \quad (6)$$

$$\Delta P_{ПА}^{i,j} = \Delta P_{ПА}^{i,j} (\beta_{ПА}^{i,j}, d_{ПА}^{i,j}) \quad (7)$$

$$\Delta P_{ПП}^{i,j} = \Delta P_{ПП}^{i,j} (\beta_{ПП}^{i,j}, d_{ПП}^{i,j}) \quad (8)$$

где  $\Delta P_{ПА}^{i,j}$ ,  $\Delta P_{ПП}^{i,j}$  и  $\Delta P^{i,j}$  – перепады давления  $i$ -го загрязнения в  $j$ -м слое, создаваемые ПА и ПП волокнами и их результирующее значение, соответственно.

Зная эффективность фильтрования, можно найти оптимум концентраций волокон в слое фильтрующего элемента для фильтрования выбранного ансамбля аэрозоля. С помощью МНК, на основе численной модели рассчитаны оптимальные параметры формования комбинированного материала фильтрующего элемента (расход раствора электроформования), обеспечивающие распределение фильтрующих ПА волокон по толщине материала, при которой фильтрующий элемент будет иметь максимальную пылеемкость (рисунок 1, стрелкой показано направление потока аэрозольных частиц).



а – зависимость распределения фильтрующих ПА волокон от толщины комбинированного материала фильтрующего элемента, б – зависимость массы загрязнителя в слое от толщины комбинированного материала фильтрующего элемента различных распределений фильтрующих волокон

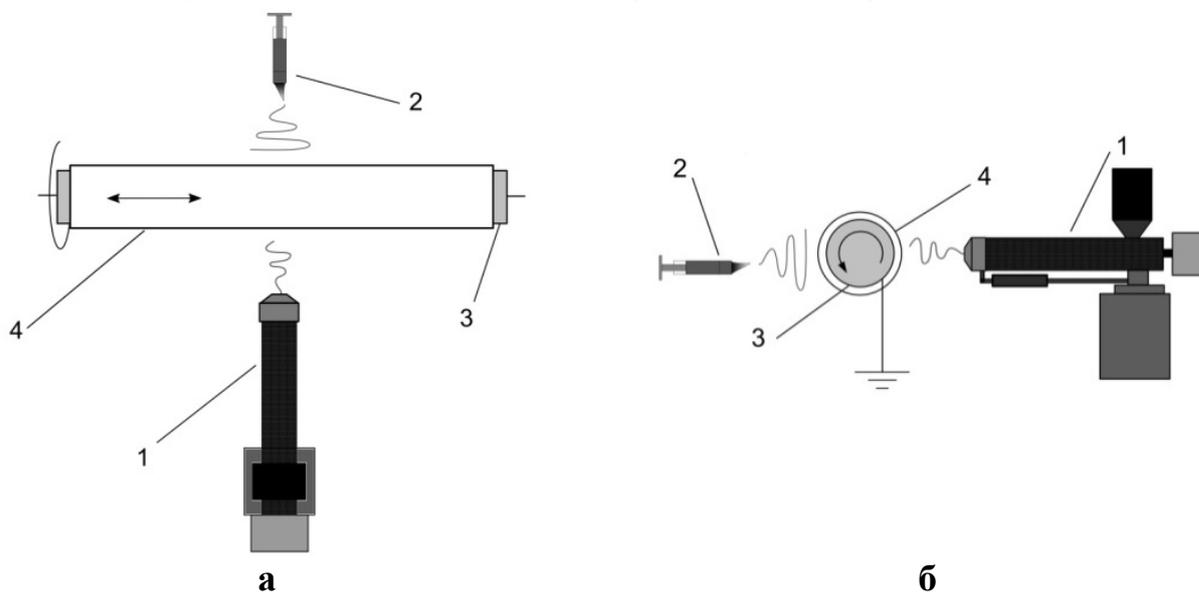
Рисунок 1 – Расчёт оптимальных эксплуатационных характеристик

Полученная расчётная модель позволяет на основании заданных технологических параметров формования фильтрующего элемента прогнозировать фильтрующие характеристики воздушного фильтрующего элемента. На основе расчётной модели проведена оценка ресурса эксплуатации фильтрующего элемента для выбранного ансамбля частиц. Показано, что с помощью функционально-градиентного подхода ресурс эксплуатации фильтрующего элемента можно увеличить в 4,5 раза. При этом массовый расход сырья (полимеров), затраченный на производство функционально-градиентных фильтрующих элементов и фильтрующих элементов с равномерным распределением ПА волокон будет одинаковым. Таким образом, результаты модельного расчёта подтверждают, что функционально-градиентный подход профилирования комбинированного материала фильтрующего элемента имеет большой потенциал в применении тонкой очистки воздуха.

**В третьей главе** приведены результаты научно-исследовательской работы по подбору композиций полимерных фильтрующих волокон и изучению динамики электрического заряда толстослойного пористого диэлектрика при изготовлении высокоэффективного фильтрующего элемента с применением метода электроформования.

Новый фильтрующий элемент изготавливается из двух типов волокон. Первый – полипропиленовые волокна диаметром 100-300 мкм. Такие волокна получают на основе метода экструзии с аэродинамическим раздувом расплава. При укладке на барабан волокна сплавляются между собой в точках контакта. Этот тип волокон образует объёмный несущий каркас фильтрующего элемента, то есть, выполняет силовую функцию. Второй тип волокон – полимерные волокна, диаметром 50-500 нм. Этот тип волокна в объёме фильтрующего

элемента крепится на объемном несущем каркасе из экструдированных волокон и обеспечивает процесс фильтрования. Волокна получают путем электроформования волокнистого материала из раствора полимера. На рисунке 2 показана принципиальная схема опытной установки для производства комбинированного фильтрующего элемента. В состав опытной установки входит экструдер, шприцевой насос с металлическим капилляром (к капилляру подключено напряжение минус 15 кВ – минус 40 кВ) и шпуля.



1 – экструдер, 2 – блок электроформования, 3 – шпуля, 4 – фильтрующий элемент;

а – вид сверху, б – вид сбоку

Рисунок 2 – Процесс получения комбинированного фильтрующего элемента

Электроформованные волокна, в силу особенности метода их получения, обладают высоким поверхностным зарядом. После нанесения нескольких слоев волокнистого материала фильтрующего элемента режим процесса электроформования сильно меняется, что препятствует получению толстослойного материала. Поскольку толщина формируемого материала фильтрующего элемента достаточно велика, требуется разработать эффективный способ, с помощью которого можно снимать нанесенный поверхностный заряд в течении всего времени изготовления фильтрующего элемента. Для исследования динамики электрического заряда толстослойного пористого диэлектрика при его естественной разрядке была изготовлена установка, моделирующая технологический процесс во время «намотки» материала фильтрующего элемента (рисунок 2).

Измеряя потенциал поверхности фильтрующего элемента в зависимости от времени перемещения заряженного участка, были получены данные остаточного потенциала поверхности фильтрующего элемента для разных значений времени разрядки поверхности фильтрующего элемента. Также чтобы продемонстрировать всю полноту картины процесса разрядки фильтрующего элемента, были проведены измерения остаточного заряда на поверхности фильтрующего элемента на временах много больших периода вращения (рисунок 3).

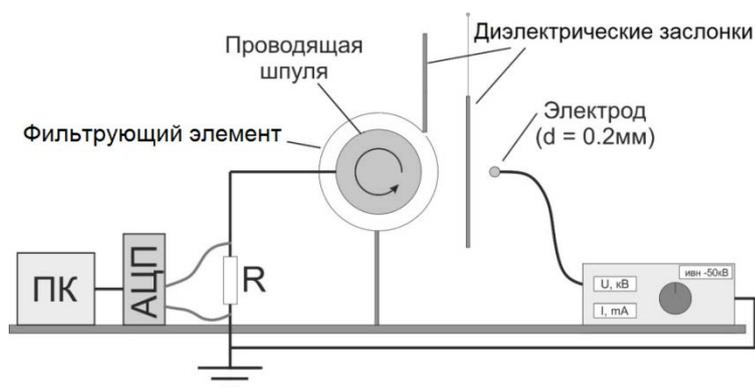
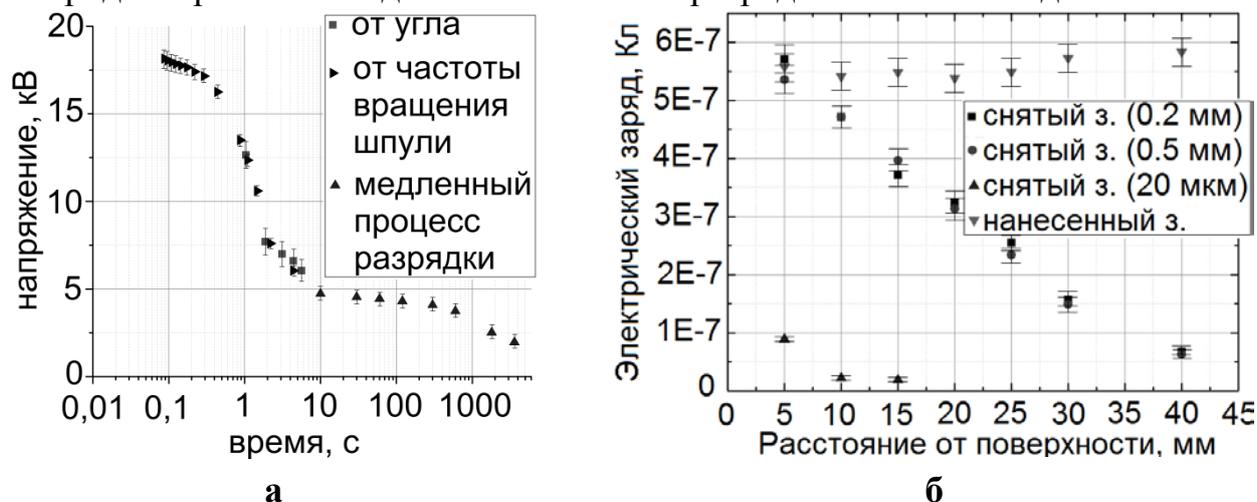


Рисунок 3 – Установка для измерения заряда, накопленного на поверхности фильтрующего элемента

Отложив все экспериментальные данные по разрядке фильтрующего элемента на одном графике, получим полную картину разрядки фильтрующего элемента (рисунок 4 (а)). В результате, существует два различных физических процесса стекания заряда с поверхности фильтрующего элемента. Первый – быстрый процесс стекания заряда, происходящий за единицы секунд и второй – медленный, характерное время стекания заряда 50 минут.

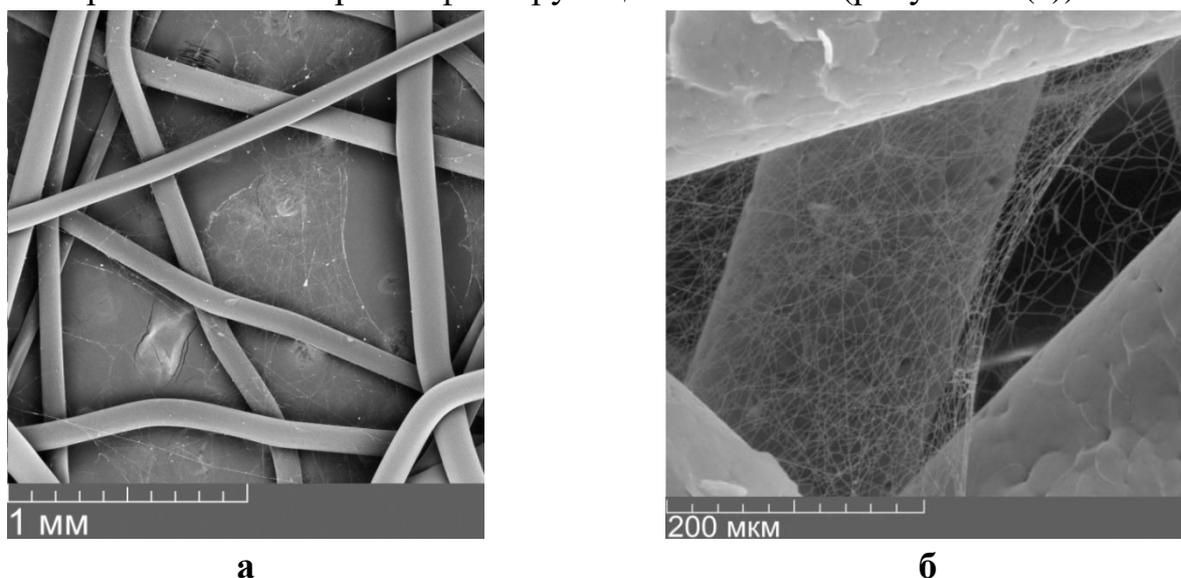
Для разработки эффективного способа снятия заряда с поверхности фильтрующего элемента была реализована схема, позволяющая разряжать поверхность фильтрующего элемента заземленным проволочным электродом. Из рисунка 4 (б) видно, что заземленный электрод на расстоянии от 0 до 5 мм снимает весь заряд с поверхности фильтрующего элемента. При удалении электрода на расстояние до 30 мм величина разрядки линейно спадает.



а – быстрый и медленный процессы разрядки, б – сравнение величины поверхностного заряда с величиной заряда, снятого заземленным электродом  
Рисунок 4 – Электрические характеристики комбинированного материала фильтрующего элемента

Таким образом, был исследован процесс накопления и стока электрического заряда комбинированного фильтрующего элемента цилиндрической формы в процессе формования. И предложен способ снятия заряда с комбинированного материала фильтрующего элемента при его формовании, который можно эффективно и удобно использовать при производстве комбинированных фильтрующих элементов.

С целью выбора наиболее эффективной композиции каркасных ПП и фильтрующих полимерных волокон был проведён анализ научной периодики волокнистых фильтрующих материалов, получаемых методом электроформования. В результате подбора с точки зрения эксплуатационных свойств материала (прочностные свойства волокон) и технологии производства (параметры формования, вредность), была предложена известная в литературе композиция синтетических волокнообразующих полимеров: каучукоподобный сополимер винилиденфторида и гексафторпропилена СКФ-26 ( $M_n$  (молекулярная масса) =  $5 \cdot 10^5$ ) и сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом Ф-42 ( $M_n = 2 \cdot 10^5$ ). Растворитель N,N-Диметилформамид. Были получены образцы и с помощью СЭМ сделаны снимки полимерного комбинированного материала фильтрующего элемента (рисунок 5 (а)).



**а**

**б**

а – СКФ-26 и Ф-42 (30 % / 70 %), б – ПА 6.6

Рисунок 5 – СЭМ изображения образцов комбинированного материала фильтрующего элемента, полученные на основе полимеров

Как видно на рисунке 5 (а), образцы комбинированного материала фильтрующего элемента состоят из «крупных» ПП волокон и «тонких» субмикронных фильтрующих волокон. Однако образцы композиции СКФ-26 и Ф-42 имеют неравномерную структуру. На рисунке 5 (а) наблюдаются участки с локальным или полным отсутствием тонких фильтрующих волокон, агломерации по контуру разрыва «сетки». Дефектность материала объясняется размягчением и последующей деструкцией волокон при контакте с «горячими» волокнами ПП.

Среди волокнообразующих полимеров, применяемых для электроформования, обладающих повышенными термомеханическими характеристиками, хорошо зарекомендовал себя ПА. Среди различных видов ПА наибольшей температурой плавления обладает полигексаметиленадипинамид ПА 6.6 ( $T_{\text{плавления}} = 260 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $M_n = 3 \cdot 10^4$ ). Для получения термостойких образцов комбинированного материала приготавливался полимерный раствор для электроформования: массовая доля

ПА 6.6. в муравьиной кислоте 7 %. На рисунке 5 (б) наблюдается равномерная сеточная структура «тонких» ПА 6.6. волокон, что доказывает термоустойчивость композиции материала фильтрующего элемента. В результате, для базовой технологии формования в качестве фильтрующих субмикронных волокон был выбран ПА 6.6.

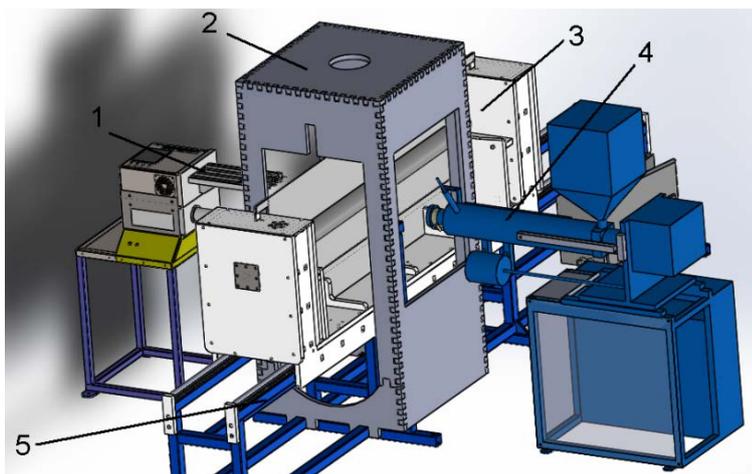
**Четвёртая глава** посвящена практической реализации разработки, в том числе промышленной апробации технологии изготовления НЕРА фильтрующего элемента объёмной фильтрации на основе толстослойного самонесущего волокнистого материала. Техническая часть главы представляет собой описание опытной установки (станка) способного формировать комбинированный фильтрующий элемент за один технологический этап (рисунок 6), материалов формования, а также описана методика испытания фильтрующей способности комбинированного элемента.

С целью создания, технологии производства нового типа воздушных фильтрующих элементов классов E10 - H14 (ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010), был разработан станок формования комбинированных воздушных фильтрующих элементов. Опытная установка представляет собой три стационарных устройства, функционирующих в составе станка по производству комбинированных фильтрующих элементов (рисунок 6):

1. Экструдер. Его основным назначением является формования электретных ПП фильтрующих элементов. Этот «узел» станка, формирует каркасные (100-300 мкм) волокна фильтрующего элемента из расплава полимера (ПП).

2. «Электроспиннер». Аппарат генерации тонких фильтрующих волокон. «Узел» станка, формирующий тонкие (50-500 нм) ПА волокна.

3. «Каретка». Аппарат, с помощью которого послойно «выращивается» комбинированный фильтрующий элемент.



1 – «Электроспиннер», 2 – вытяжной короб, 3 – динамическая часть «Каретки», 4 – экструдер, 5 – основание «Каретки»;

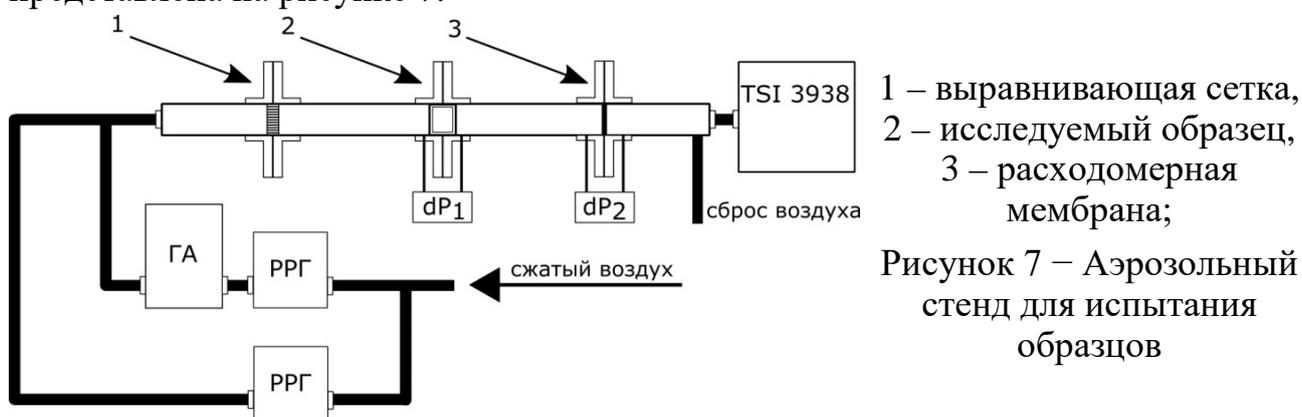
Рисунок 6 – Трёхмерная модель станка для производства комбинированных фильтрующих элементов

Для испытания фильтрующего элемента на эффективность фильтрования требуется создать поток воздуха, засеянный аэрозольными частицами, затем измерить концентрацию частиц в воздухе на входе и выходе фильтрующего элемента. В этом случае эффективность фильтрования  $\eta$  вычисляется по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{N_{out}}{N_{in}} \quad (9)$$

где  $N_{out}$  – концентрации частиц после, а  $N_{in}$  – перед фильтрующим элементом.

Как известно, эффективность фильтрации аэрозольных частиц сильно зависит от их размера. Поэтому, согласно ГОСТ Р ЕН 1822, эффективность фильтрации определялась по наиболее проникающим частицам (МРПС – most penetrative particle size). Схема аэрозольного стенда для испытаний фильтрующей способности комбинированного фильтрующего элемента представлена на рисунке 7.

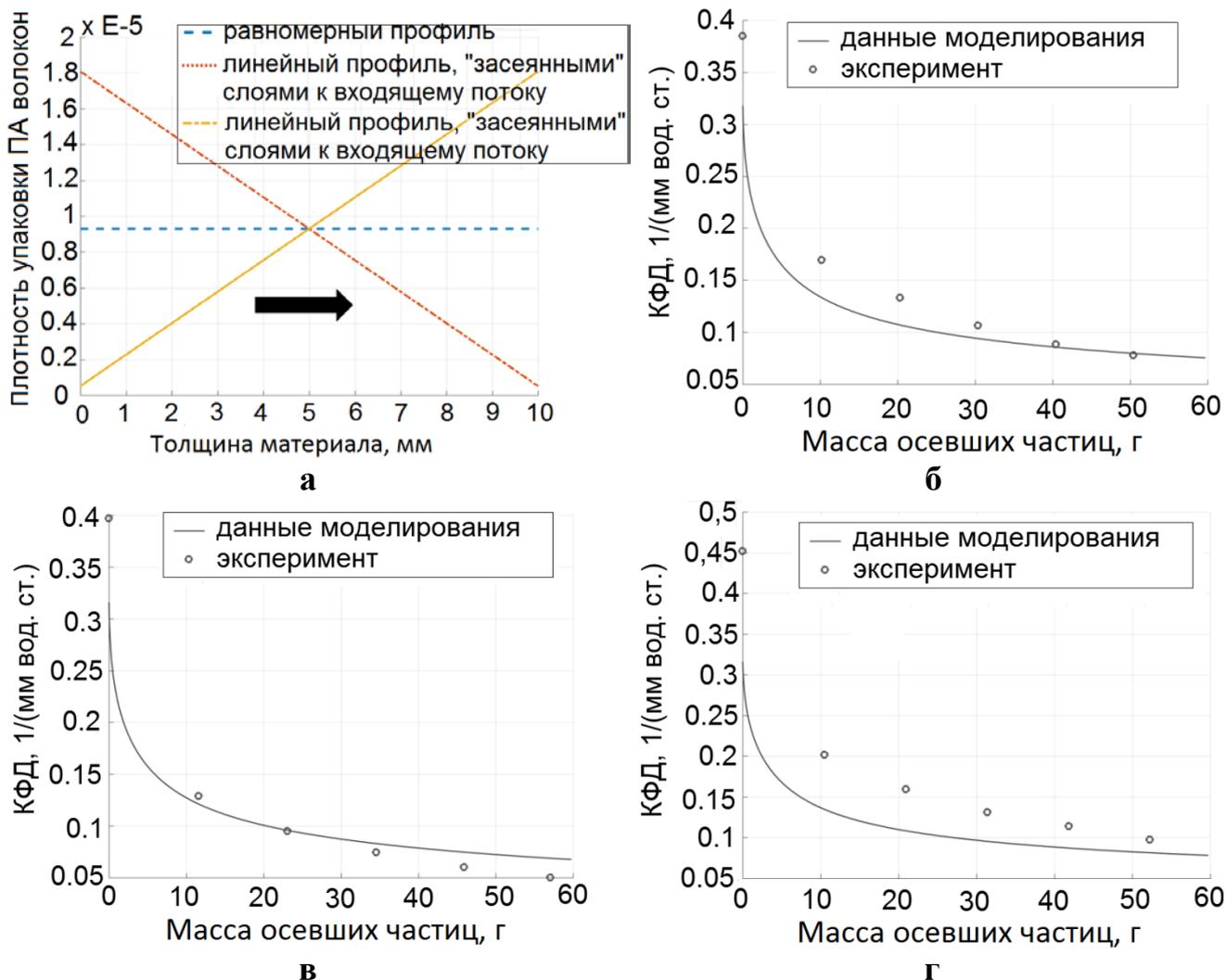


Методика испытания фильтрующих характеристик комбинированного элемента на аэрозольном стенде заключается в следующем: поток чистого воздуха смешивается с аэрозолем постоянной концентрации и распределения, который подаётся в канал, где устанавливается исследуемый образец. Далее спектрометром частиц измеряется концентрация до и после установки образца в стенд.

На основе ресурсных испытаний, была апробирована расчётная физико-математическая модель фильтрующего элемента. На рисунке 8 данные моделирования и эксперимента. Ресурсные испытания равномерных и профилированных (таблица 1) образцов показали, что фильтрующий элемент с более эффективным распределением фильтрующих волокон имеет больший коэффициент фильтрующего действия (КФД). В таблице 1 основные начальные характеристики опытных образцов фильтрующих элементов и эти характеристики после оседания на фильтре 50 г загрязнителя.

Таблица 1 – Значения характеристик фильтрации до («0») и после испытаний при скорости фильтрации 5 см/с

Профиль фильтрующего элемента	$\eta_0$ , %	$\eta$ , %	$\Delta P_0$ , Па	$\Delta P$ , Па	КФД <sub>0</sub> , (мм вод. ст.) <sup>-1</sup>	КФД, (мм вод. ст.) <sup>-1</sup>
равномерный	98	92	40,5	134	0,38	0,08
линейный, "засеянными" слоями к входящему потоку	97,5	86	40,5	145	0,39	0,06
линейный, разреженными слоями к входящему потоку	99	96	41	135	0,45	0,11



а – зависимость плотности упаковки фильтрующих волокон от толщины материала фильтрующего элемента (стрелкой показано направление потока аэрозольных частиц), б – зависимость КФД образца с равномерным распределением фильтрующих волокон от массы осевших частиц, в – зависимость КФД образца с линейный профилем установленный «засеянными» слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц, г – зависимость КФД образца с линейный распределением установленный разреженными слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц

Рисунок 8 – Расчётные данные и данные испытаний комбинированного фильтрующего элемента

Релаксация (разрушение) фильтрующих ПА волокон снижает эффективность комбинированного фильтрующего элемента, что косвенно подтверждается лучшим согласованием модели и эксперимента для более хороших образцов в смысле распределения массы загрязнителя по толщине фильтрующего элемента (рисунок 8). На основании результатов испытаний и моделирования приведены основные преимущества и недостатки представленной технологии формования. Конкурентным преимуществом фильтрующего элемента являются: высокий КФД при скорости потока воздуха 1 см/с составил  $2,2 \text{ (мм вод. ст.)}^{-1}$ ; одноэтапная технология производства

фильтрующего элемента; возможность создания профилированных структур позволяющих максимально увеличить ресурс эксплуатации без увеличения энергетических и сырьевых затрат (затрат на производство). Недостатком фильтрующего элемента является релаксация (разрушение) фильтрующих ПА волокон при фильтровании жидких аэрозолей, снижающая эффективность комбинированного фильтрующего элемента. В случае жидких аэрозольных частиц для создания ресурс пригодного фильтрующего элемента требуется максимально равномерный рост среднего диаметра фильтрующих волокон по толщине фильтрующего элемента, что позволит создать меньшую нагрузку на фильтрующие волокна и продлить срок эксплуатации фильтрующего элемента.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработана численная физико-математическая модель фильтрования частиц комбинированного фильтрующего элемента, позволяющая прогнозировать основные характеристики функционально-градиентного материала фильтрующего элемента в процессе эксплуатации. Проведена оценка ресурса эксплуатации фильтрующего элемента для выбранного ансамбля частиц. За 177 суток эксплуатации фильтрующего элемента с оптимальным профилем нановолокон эффективность фильтрования снижается с 90 до 82 %.

2. Предложены наиболее эффективные композиции волоконобразующих полимеров, способные обеспечить требуемые фильтрующие свойства. Для массового производства фильтрующих элементов рекомендовано использовать рецептурную композицию: массовая доля ПА 6.6. в растворителе 6 – 12 %.

3. Разработан и запатентован способ формования фильтрующего элемента с применением процесса экструзии и метода электроформования. Самонесущий материал фильтрующего элемента состоит из волокон диаметром 100 – 300 мкм и фильтрующих волокон диаметром 50 – 500 нанометров.

4. Установлено, что заземлённый электрод вблизи материала снимает электрический заряд при изготовлении полимерного фильтрующего элемента. На основе результатов экспериментальных исследований накопления и стока электрического заряда от времени рекомендовано использовать заземлённый электрод диаметром 500 мкм на расстоянии не более 5 мм от поверхности материала.

5. Создана технология производства фильтрующего элемента типа НЕРА, обладающего повышенной эффективностью улавливания аэрозольных частиц в аппаратах очистки воздуха. Технология обеспечивает создание фильтрующих элементов классов E10 – H14 (эффективность очистки 85 – 99,995 %) при скорости фильтрования 5 см/с.

6. На основе ресурсных испытаний установлено, что для фильтрующего элемента с линейным распределением нановолокон по толщине материала при скорости фильтрования 5 см/с: начальная эффективность очистки и перепад давления 99 % и 41 Па, соответственно. На основе ресурсных испытаний проведена верификация функциональных возможностей комбинированного фильтрующего элемента.

## ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Мик, И.А. Метод формования высокоэффективного самонесущего композитного фильтрующего материала из полимерных микро- и нановолокон [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев, Д.А. Трубицын // Экология и промышленность России. – 2017. – Т.21. №4, – С. 13–19.
2. Мик, И.А. Изучение динамики зарядки пористого диэлектрика при формировании высокоэффективных аэрозольных фильтров методом гибридного формования [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев, М.И. Тырышкин, Д.А. Трубицын // Пластические массы. – 2017. – №7-8, – С. 55–64.
3. Мик, И.А. Моделирование работы гибридного фильтрующего материала [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев // Ползуновский вестник. – 2018. – №1, – С. 135–142.
4. Мик, И.А. Расчёт оптимального профиля фильтрующих нановолокон комбинированного материала [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев, В.В. Ларичкин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2018. – №3, – С. 24–28.
5. Мик, И.А. Контролируемое изготовление композитного материала фильтра состоящего из несущей матрицы микро волокон и фильтрующих нано волокон для высоко эффективной фильтрации аэрозольных частиц [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев // Материалы международной научно-практической конференции «Современное состояние науки и техники». – Сочи: Изд-во «Оптима». – 2016. – С. 107–110.
6. Мик, И.А. Разработка композитного материала фильтра состоящего из несущей матрицы микро волокон и фильтрующих нано волокон для высоко эффективной фильтрации аэрозольных частиц [Электронный ресурс] // Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии: Материалы VI Всероссийской конференции молодых ученых. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН. – 2016 – С. 279–281.
7. Мик, И.А. Изготовление композитного материала фильтра состоящего из несущей матрицы микроволокон и фильтрующих нановолокон для высокоэффективной фильтрации аэрозольных частиц [Текст]. Труды XVII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.». – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2016. – Т.3. – С. 259–262.
8. Лебедев, А.С. Изучение феномена снижения эффективности фильтрации волокнистых фильтрующих материалов при загрязнении капельным аэрозолем [Текст] / А.С. Лебедев, И.А. Мик // Материалы 55-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2017: Физика сплошных сред. – Новосибирск: Изд-во издательско-полиграфический центр НГУ. – 2017. – С. 49.
9. Мик, И.А. Способ производства самонесущего композитного фильтрующего материала из микро- и нано- волокон [Электронный ресурс] / И.А. Мик, В.Н. Горев // Тезисы докладов международной конференции «Одиннадцатые Петряновские и Вторые Фуксовские чтения». – Москва. – 2017 – С. 30–32.
10. Мик, И.А. Экспериментальное изучение динамики зарядки пористого диэлектрика при получении толстослойного волокнистого материала [Электронный ресурс] / И.А. Мик, В.Н. Горев // Тезисы докладов международной конференции «Одиннадцатые Петряновские и Вторые Фуксовские чтения». –Москва. – 2017 – С. 32–34.
11. Мик, И.А. Исследование динамики зарядки пористого полимерного фильтра [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев // Труды XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.». – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2017. – Т.3. – С. 259–261.

12. **Мик, И.А.** Метод производства энергоэффективного аналога НЕРА фильтра на основе гибридного фильтрующего наноматериала [Текст] / **И.А. Мик, В.Н. Горев, Р.О. Колбаскин** // Материалы 10-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности». –Бийск: Изд-во АлтГТУ – 2017. С. 105–107.

13. **Мик, И.А.** Измерение параметров зарядки пористого диэлектрика в процессе производства аэрозольных фильтров методом гибридного формования [Текст] / **И.А. Мик, В.Н. Горев, А.С. Лебедев** // Материалы 12-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (ИАМП-2017). –Бийск: Изд-во АлтГТУ – 2017. С. 221–222.

14. Лебедев, А.С. Изучение феномена снижения эффективности фильтрации волокнистых фильтрующих материалов при загрязнении капельным аэрозолем [Текст] / А.С. Лебедев, К.В. Коновалов, **И.А. Мик** // Физика сплошных сред : Материалы 56-й Междунар. науч. студ. конф. / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ. –2018. – С. 15.

15. Коновалов, К.В. Автоматизация экспериментальной установки для получения функционально-градиентного фильтрующего материала, состоящего из каркасных волокон субмиллиметрового диаметра и фильтрующих волокон субмикронного диаметра [Текст] / К.В. Коновалов, А.С. Лебедев, **И.А. Мик** // Инструментальные методы и техника экспериментальной физики : Материалы 56-й Междунар. науч. студ. конф. / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ. –2018. – С. 13.

16. **Патент на изобретение № 2639702 РФ. МПК В01Д 39/16, В82В 3/00. Объемный фильтр из нетканого самонесущего материала / Д.А. Трубицын, В.Н. Горев, И.А. Мик; заявитель и патентообладатель «ООО Тион Инжиниринг». – Дата подачи заявки 24.02.2016, опубл. 21.12.2017, Бюл. № 36.**

---

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Тел./факс: (383)346-08-57  
формат 60x84 1/16, объем 2,5 п.л., тираж 120 экз.  
заказ № 1109 подписано в печать 00.00.2019 г.